

## Rozpoznanie złoża piaskowców budowlanych z wykorzystaniem geofizycznych badań elektrooporowych i georadarowych

Wojciech Klityński<sup>1</sup>, Katarzyna Stelmach<sup>2</sup>, Michał Stefaniuk<sup>1</sup>, Jerzy Karczewski<sup>1</sup>



W. Klityński



K. Stelmach



M. Stefaniuk



J. Karczewski

**Recognition of building sandstone deposit with the use of geophysical resistivity sounding and georadar methods.** *Prz. Geol.*, 62: 621–628.

*A b s t r a c t.* The paper presents the application of Vertical Electrical Sounding (VES) and Ground Penetrating Radar (GPR) into recognition of the geometry and vertical differentiation of a deposit of color sandstones that are commonly used as elevation stones in building industry. The investigations covered sandstones of Lower Cretaceous age (Albian) that occur at the foothills of the Chełmo Mt. near Kolonia

Grabowie (Radomsko district, Łódź province). The former quarry of Grabowie is situated in the forest area of the landscape park and this blocked further exploitation from the documented deposit. On a limited scale sandstone is still quarried from the southern edge of the old quarry. However, poor recognition of the deposit hampers the effective exploitation. The objective of the geological investigations was to examine a new part of the deposit including identification of the roof and the bottom of sandstone complex, the thickness of overlying rocks, location of faults and weathered zones, as well as recognition of the lithology down to a depth of 8 m below ground surface. Resistivity distribution in the study area was assessed with the use of VES. Much higher resistivity of sandstones as compared to surrounding rocks was advantageous. Owing to high resolution GPR, the deposit boundaries could be delineated and the stratification within the sandstone complex could be represented. The investigations resulted in construction of 2D models of the deposit and surrounding rocks and gave information on the lithology.

**Keywords:** Vertical Electrical Sounding (VES), resistivity, Occam inversion, Ground Penetrating Radar (GPR), sandstone complex

Geofizyczne metody elektromagnetyczne umożliwiają wykrycie złoża, określenie jego charakterystyki petrofizycznej oraz rozpoznanie skał otaczających, które determinują sposób eksploatacji. Metody te wykorzystują właściwości fizyczne skał, które określają przebieg zjawisk elektromagnetycznych w ich obrębie. Właściwościami tymi są: oporność elektryczna skał  $\rho$ , ich przenikalność elektryczna  $\epsilon$  oraz przenikalność magnetyczna  $\mu$ . Do grupy tych metod należą m.in. pionowe sondowania elektrooporowe VES (ang. *Vertical Electrical Sounding*) oraz pomiary georadarowe GPR (ang. *Ground Penetrating Radar*). Powyższe metody są uznawane za nieinwazyjne, nie stwarzające jakichkolwiek zagrożeń dla środowiska zarówno geologicznego, jak też biologicznego. Połączone wyniki badań wykonanych z wykorzystaniem ww. metod umożliwiają określenie pseudo-2D modelu złoża i skał otaczających (dla dwóch profili), a także pozwalają na uzyskanie informacji o ich zmienności litologicznej.

W niniejszej pracy zastosowano sondowania elektrooporowe oraz pomiary georadarowe w celu rozpoznania warunków zalegania złoża piaskowców, tj. określenia miąższości kompleksu złożowego, lokalizacji uskoków, a także miejsc zwietrzałych, określenia głębokości stropu i spągu warstwy piaskowców, określenia miąższości nadkładu oraz zmienności litologicznej w obrębie złoża. Przedmiotem rozpoznania były piaskowce kredy dolnej piętra albu, leżące u podnóża Góry Chełmo w pobliżu Kolonii Grabowie, w powiecie radomszczańskim, w województwie łódzkim.

### CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

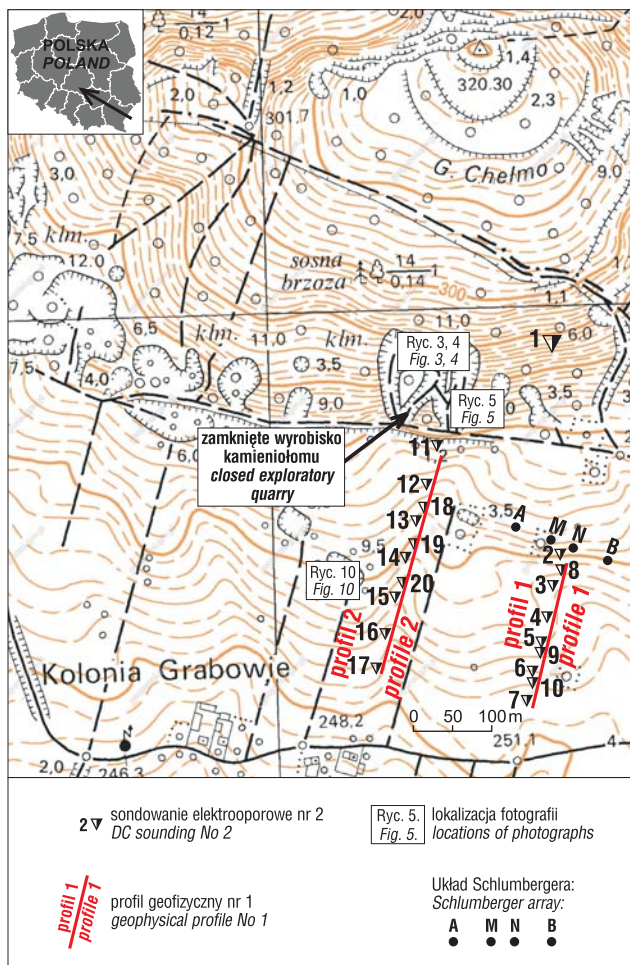
Obszar prezentowanych badań jest zlokalizowany u podnóża południowych stoków Góry Chełmo, nazywanej lokalnie Chełmską Górą (ryc. 1). Na południe od tego obszaru jest położona Kolonia Grabowie oraz większa miejscowość Zagórze. Administracyjnie obszar badań należy do gminy Wielgomłyny w województwie łódzkim (Miziołek, 2005). Chełmska Góra jest lokalną kulminacją (320 m n.p.m.) w obrębie Wyżyny Przedborskiej, zaliczonej do pasa Wyżyn Śródpolskich (Kondracki, 1964). Wschodnie stoki wzgórza zapadają łagodnie do doliny Pilicy. Na jego zboczach, głównie południowych, są widoczne liczne wyrobiska poeksploatacyjne. W części z nich nadal sporadycznie jest eksploatowany piaskowiec budowlany.

### Zarys geologii

Tektonicznie teren badań jest położony w obrębie elewacji radomszczańskiej. Powstała ona w miejscu, gdzie synklinorium szczecińsko-łódzko-miechowskie przecina strefa dyslokacyjna na linii Wieluń–Krańnik (Pożaryski, 1974). Synklinorium szczecińsko-łódzko-miechowskie powstało w fazie ruchów laramijskich i dzieli się na trzy odcinki depresyjne (niecki) oddzielone elewacjami. Nieckę szczecińską od łódzkiej dzieli elewacja obornicka, a łódzką od miechowskiej – radomszczańska (Pożaryski, 1971). W obrębie tej strefy nastąpiły w epoce alpejskiej sil-

<sup>1</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; gpklytyn@geol.agh.edu.pl.

<sup>2</sup> Przedsiębiorstwo Podstawowych Badań i Robót Geotechnicznych GEOSTANDARD Sp. z o.o., ul. Biała 22, 54-044 Wrocław; k.stelmach@geostandard.pl.

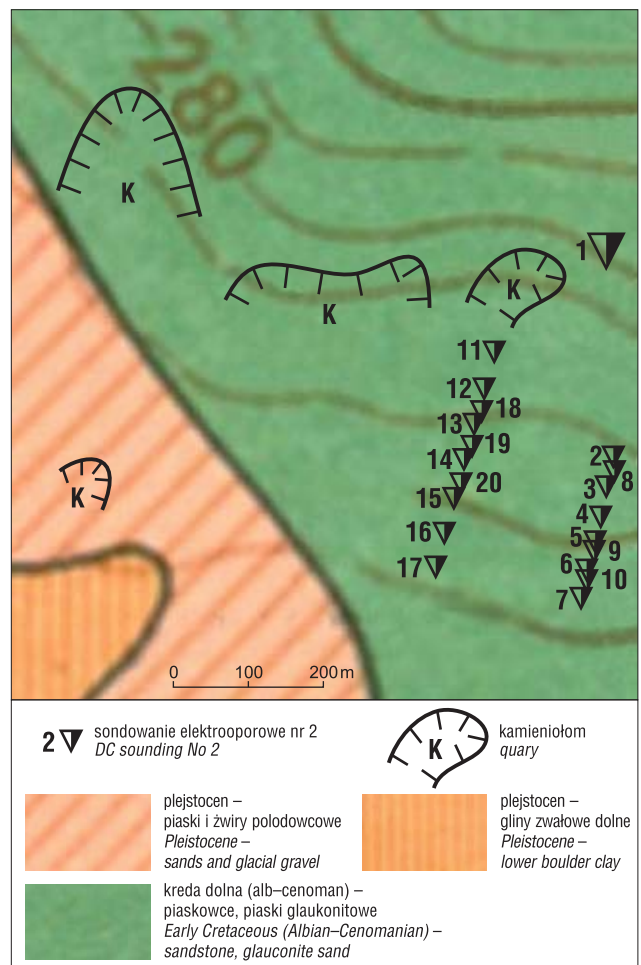


**Ryc. 1.** Lokalizacja profili geofizycznych na tle mapy topograficznej (wg <http://maps.geoportal.gov.pl>)

**Fig. 1.** Location of geophysical profiles in the topographical map (acc. to <http://maps.geoportal.gov.pl>)

ne ruchy pionowe, które doprowadziły do podniesienia terenu i utworzenia licznych antyklin i synklin. Jedną z nich jest antyklina Chełma, w obrębie której leży badany obszar. Występujące tutaj utwory mezozoiczne są przykryte osadami czwartorzędowymi i tworzą kilka grzbietów przebiegających z północnego zachodu na południowy wschód, w skład których wchodzi m.in. Grzbiet Rzejowic i Chełma. Łączą się one ku południowemu wschodowi w jeden grzbiet, zakończony górą Chełmo (320 m n.p.m.) (Łuniewski, 1947).

Utwory mezozoiczne, zalegające na starszym podłożu, są tutaj reprezentowane przez osady triasu, jury i kredy. Utwory triasu zostały wykształcone w postaci wapieni, margli, mułowców i iłowców, utwory jury to ropy, szare wapienie oraz wapienie oolitowe, natomiast utwory kredy są reprezentowane przez piaskowce i piaski (Łuniewski, 1947; Wągrowski i in., 1987). Chełmska Góra jest zbudowana z wapieni górnourajskich, dolnokredowych piaskowców albu i węglanowych osadów kredy górnej (ryc. 2). Powierzchnia piaskowców albu podlegała podczas pliocenu silnym procesom selektywnej silifikacji. Liczne bloki skrzemionkowanych osadów tego piętra są rozsiane po całym terenie (Łuniewski, 1947). Piaskowce kredowe albu, występujące w przewadze u podnóża góry Chełmo, są zaliczane do facji piaszczystej i leżą one na łożach stropowych jury górnej piętra kimerydu (Cieśliński, 1960; Wągrowski, 1990).



**Ryc. 2.** Mapa geologiczna rejonu badań (wg Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski, ark. Rzejowice – 774, opr. Wągrowski, 1983)

**Fig. 2.** Geological map of the study area (acc. to Detailed Geological Map of Poland, sheet Rzejowice – 774, elaborated by Wągrowski, 1983)

### Charakterystyka złoża piaskowców budowlanych

U stóp Chełmskiej Góry udokumentowano trzy strefy złożowe, określone jako złoża piaskowca „Grabowiec”, „Chełmska Góra” i „Zagórze” (Miziołek, 2005). Złoża buduje dolnokredowy piaskowiec albski, drobnoziarnisty, o spoiwie krzemionkowym, barwy od ciemnoczerwonej do brunatnej, miejscami wyraźnie zażelaziony (ryc. 3). W piaskowcach sporadycznie spotyka się wkładki chalcedonitów i piasków glaukonitowych. Warstwy kompleksu złożowego zapadają łagodnie ku SW pod kątem 6–7°, są przecinane wyrazistymi pionowymi i ukośnymi spękaniami ciosowymi, zapewne diagenetycznymi i/lub tektonicznymi (ryc. 4). W obrębie ławic piaskowcowych jest widoczna laminacja horyzontalna, miejscami ukośna lub falista. W wyrobiskach można dostrzec niewielkie uskoki kompresyjne i syntektoniczne zróżnicowanie miąższości lamin.

Strop kompleksu piaskowcowego jest nieregularny z wyraźnymi śladami erozji (ryc. 5). Nadkład jest zbudowany z gruboklastycznego rumoszu przykrytego warstwą gleby. Jego miąższość zmienia się od około 0,5 do 1,8 m (Miziołek, 2005).



**Ryc. 3.** Nieczynne wyrobisko kamieniołomu – widok ogólny. Ryc. 3, 4, 5 i 10 fot. W. Klityński

**Fig. 3.** Closed exploratory quarry – an overall view. Photos 3, 4, 5 and 10 by W. Klityński



**Ryc. 4.** Piaskowce budowlane w ścianie nieczynnego kamieniołomu

**Fig. 4.** Building sandstone in closed quarry face



**Ryc. 5.** Strop warstwy piaskowcowej w ścianie nieczynnego kamieniołomu

**Fig. 5.** Roof of sandstone layer in closed quarry face

Pomiary elektromagnetyczne dotyczyły wspomnianych powyżej piaskowców kredy dolnej piętra albu. Teren, na którym wykonano pomiary, leży w obrębie antykliny Chełma i jest usytuowany na południowym zboczu Góry Chełma, w sąsiedztwie udokumentowanych dwóch złóż piaskowca: „Zagórze” i „Chełmska Góra” (Dokumentacja, 2013).

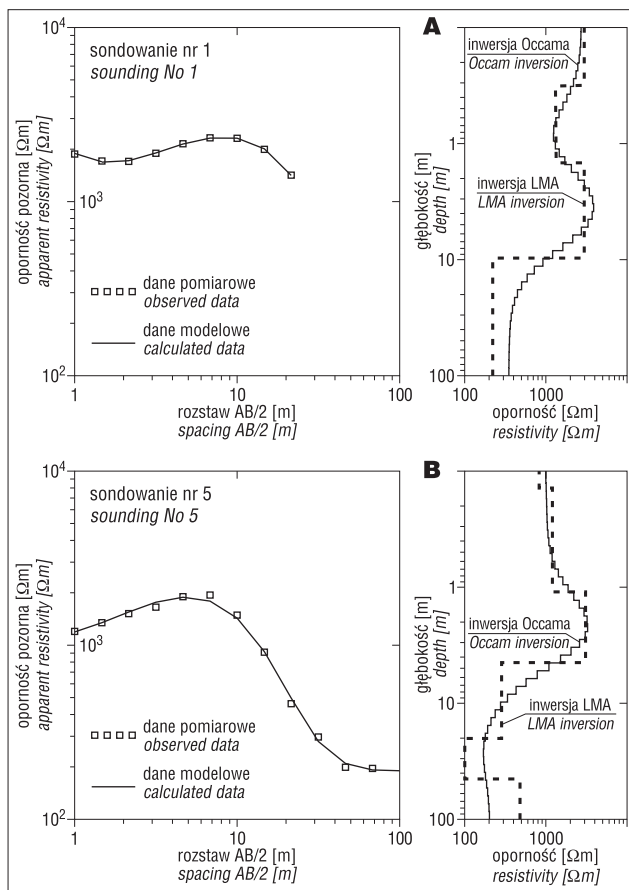
## BADANIA GEOFIZYCZNE

### Sondowania elektrooporowe

Metoda sondowań elektrooporowych jest od wielu lat stosowana w nieinwazyjnych badaniach powierzchniowych. Jest ona bardzo szeroko opisana w literaturze (Koefoed, 1979; Telford i in., 1990; Reynolds, 2011). Metoda ta wykorzystuje prąd stały jako źródło pola elektrycznego, a pomiar różnicy potencjałów pomiędzy elektrodami napięciowymi ( $M$  i  $N$ ) pozwala uzyskać tzw. oporność pozorną  $[\Omega m]$  odzwierciedlającą rozkład oporności  $[\Omega m]$  w badanym ośrodku. Umożliwia to układ składający się z dwóch elektrod prądowych ( $A$  i  $B$ ) i dwóch elektrod pomiarowych ( $M$  i  $N$ ). W efekcie, w wyniku pomiaru, uzyskujemy tzw. krzywą sondowania elektrooporowego, tj. krzywą oporności pozornej w zależności od rozstawu  $(AB/2)$  (ryc. 1). Prace terenowe wykonywano 4-elektrodowym układem Schlumbergera. Rozstawy układu pomiarowego zwiększano w postępie geometrycznym  $AB/2 = 1; 1,47; 2,15; 3,16, \dots, 100$  m. Stosowano trzy wielkości dipola pomiarowego  $MN/2 = 0,25, 2,00$  i  $10,00$  m.

Pomiary wykonano wzdłuż dwóch profili: profil 1, o długości 190 m i profil 2, o długości 300 m (ryc. 1). Na profilu 1 wykonano 9 sondowań (6 z krokiem pomiarowym ok. 40 m i 3 sondowania zagęszczające), a na profilu 2 wykonano 10 sondowań (7 z krokiem pomiarowym 50 m i 3 sondowania zagęszczające). Wykonano także sondowanie w pobliżu eksploatowanego złoża piaskowców (sondowanie nr 1), w celu rozpoznania charakteru budowy geoelektrycznej badanego ośrodka. Interpretację ilościową przeprowadzono na podstawie modelu jednowymiarowego (1D). Układy pomiarowe rozmieszczano w kierunku rozciągłości struktur geologicznych, żeby uniknąć błędów związanych z wpływem struktur dwu- i trójwymiarowych na wynik interpretacji (ryc. 1). Najczęściej stosowane algorytmy w inwersji 1D, w metodzie elektrooporowej to metoda Lavenberga-Marquardta (LMA) i metoda Occama (Constable i in., 1987). Oba algorytmy są iteracyjne i wymagają wprowadzenia modelu startowego. W metodzie LMA uzyskuje się, w wyniku interpretacji, model z wyraźnymi kontrastami oporności pomiędzy kolejnymi warstwami. Wynik inwersji w dużym stopniu zależy od założonego modelu startowego i obarczony jest problemem niejednoznaczności interpretacji. Metoda Occama zakłada stałą geometrię rozkładu warstw w ośrodku geoelektrycznym, a w procesie iteracyjnym zmienia się jedynie oporność warstw. Przyjmowany jest układ warstw (40–60), których miąższość rośnie z głębokością w skali logarytmicznej. W wyniku interpretacji otrzymujemy model gładki z równomiernym rozkładem oporności. Metoda ta nie daje tak precyzyjnego wyniku jak metoda LMA, jednak w znacznym stopniu ogranicza zjawisko niejednoznaczności interpretacji.

Interpretację metodą LMA i Occama wykonano dla sondowania nr 1, w celu rozpoznania geoelektrycznego badanego ośrodka (ryc. 6). Sondowanie to umieszczono w pobliżu dawnej kopalni, gdzie głębokość stropu pias-



**Ryc. 6.** Rezultat inwersji 1D metodą Occama i LMA krzywey sondowania elektrooporowego: **A** – sondowanie nr 1 (lokalizacja na ryc. 1); **B** – sondowanie nr 5 na profilu nr 1 (lokalizacja na ryc. 1)  
**Fig. 6.** Result of Occam and LMA 1D inversion of DC sounding curves: **A** – sounding no 1 (location in Fig. 1); **B** – sounding no 5 from profile no 1 (location in Fig. 1)

kowca jest znana, co umożliwiło ograniczenie zjawiska niejednoznaczności interpretacji związanej z ekwiwalencją przekrojów geoelektrycznych. Obserwuje się dwudzielność rozkładu oporności uzyskanego w wyniku interpretacji sondowań. Zbite piaskowce charakteryzują się bardzo wysoką opornością (ok. 3000  $\Omega\text{m}$ ), natomiast skały otaczające względnie niską opornością (kilkaset  $\Omega\text{m}$ ).

Wzdłuż profili 1 i 2 wykonano interpretację metodą Occama. Model gładki uzyskany dla każdego sondowania pozwolił na przedstawienie wyników interpretacji w postaci pseudo 2D rozkładu oporności wzdłuż tych profili (ryc. 7, 8). Wykonano także interpretację 1D metodą LMA, w celu uzyskania bardziej precyzyjnego określenia głębokości granic (tj. stropu i spągu piaskowca), opierając się na wyniku interpretacji sondowania nr 1 (ryc. 1) i traktując to sondowanie jako reperowe (ryc. 7, 8). Należy jednak pamiętać, że interpretacja metodą LMA obarczona jest zjawiskiem ekwiwalencji (Constable i in., 1987).

### Badania georadarowe

Zaprezentowana w artykule metoda georadarowa (GPR) należy do najbardziej przyjaznych środowisku, nieinwazyjnych metod badania ośrodka geologicznego. Należy podkreślić, że metoda georadarowa nie daje możliwości ilościowej oceny parametrów ośrodka geologicznego, pozwala natomiast na określenie budowy litologicznej

ośrodka w sposób ciągły. Lokalizuje precyzyjnie niejednorodności budowy wewnętrznej w podłożu. Antena nadawcza georadaru emituje w głąb ośrodka impulsy elektromagnetyczne, odbijają się one na granicy różniącej się właściwościami elektromagnetycznymi (względną przenikalnością elektryczną). Obszerne wprowadzenie do metody georadarowej można znaleźć np. w opracowaniu „Zarys metody georadarowej” (Karczewski i in., 2011).

Ze względu na dużą wydajność i niskie koszty badań, metoda georadarowa powinna być stosowana na etapie rozpoznania wstępnego złoża. Szerokie zastosowanie metody GPR do badania złóż surowców mineralnych powoduje znaczne zmniejszenie ilości badań geotechnicznych, a co za tym idzie obniżenie kosztów rozpoznania złoża. Metoda ta przy swoich ogromnych zaletach ma jednak swoje ograniczenia. Silne tłumienie fali elektromagnetycznej (zwłaszcza w utworach gliniastych, ilastych) znacznie ogranicza zasięg głębokościowy metody. Zastosowanie innych, w większości nieinwazyjnych, metod geofizycznych (geoelektrycznych, grawimetrycznych, sejsmiki inżynierskiej i innych) może potencjalnie zwiększyć dokładność interpretacji. Za pomocą tych metod można wykonywać pomiary w obszarach chronionych (np. w obszarach „Natura 2000”, a nawet w ścisłych rezerwach przyrody).

**Podstawy fizyczne metody georadarowej.** Georadar służy do nieinwazyjnych geofizycznych badań przypowierzchniowej warstwy gruntu (do 50 m poniżej powierzchni gruntu w zależności od warunków geologicznych). Jednym z parametrów elektromagnetycznych ośrodka, mającym wpływ na metodę georadarową, jest przenikalność elektryczna  $\epsilon$ . Jest to współczynnik proporcjonalności w tzw. równaniach konstytutywnych (Annan, 2001). W ogólnym przypadku jest to wielkość tensorowa. W praktyce najczęściej definiuje się bezwymiarową względną przenikalność elektryczną  $\epsilon_r$  ośrodka:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1)$$

gdzie:

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36 \cdot \pi} [F/m] \text{ – przenikalność elektryczna próżni.}$$

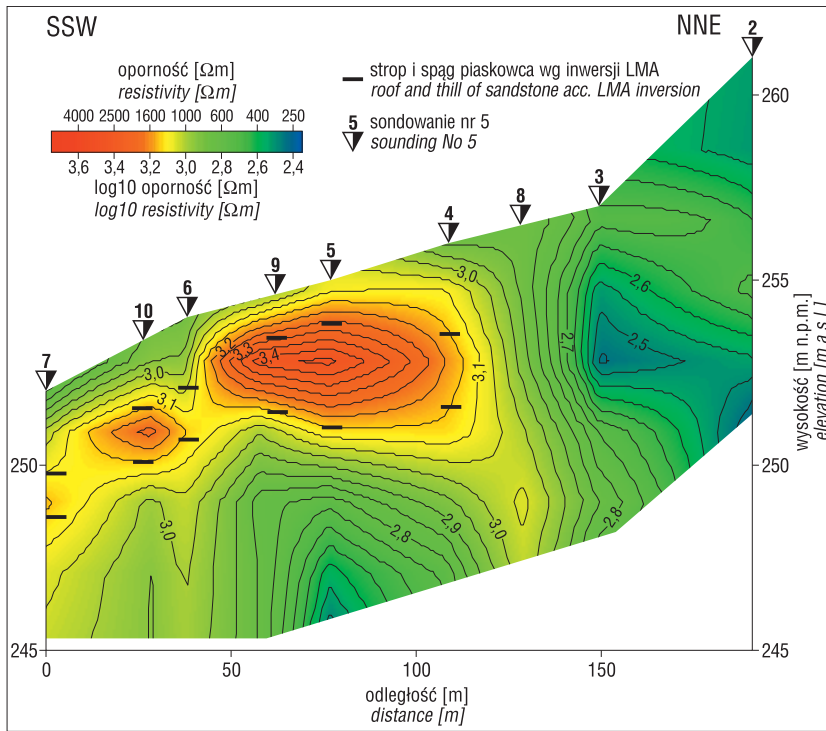
Antena nadawcza georadaru (w zależności od konstrukcji) emituje falę elektromagnetyczną, o częstotliwości od 10 nawet do 6000 MHz (georadary firmy Utsi Electronics). Fala ta odbija się na granicy dwóch ośrodków różniących się wartością względnej przenikalności elektrycznej. Im większy kontrast względnej przenikalności elektrycznej pomiędzy dwoma ośrodkami, tym większa amplituda fali odbitej. Wartość  $\epsilon_r$  wpływa także na prędkość rozchodzenia się emitowanej fali. Związek pomiędzy prędkością a względną przenikalnością elektryczną ma postać:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

gdzie:

$$c \approx 3 \cdot 10^8 [m/s] \text{ – prędkość fali elektromagnetycznej w próżni.}$$

W tabeli 1 przedstawiono wartości względnej przenikalności elektrycznej i prędkości fali elektromagnetycznej dla kilku wybranych ośrodków.



**Ryc. 7.** Pseudo-2D przekrój oporności uzyskany w wyniku inwersji 1D metodą Occama z wynikami inwersji 1D metodą LMA wzdłuż profilu 1 (lokalizacja na ryc. 1)

**Fig. 7.** Pseudo-2D resistivity cross-section as a result of 1D Occam inversion with results of 1D LMA inversion along profile no 1 (location in Fig. 1)

Analizując wartości względnej przenikalności elektrycznej przedstawione w tabeli 1, można stwierdzić, że obecność wody w ośrodkach skalnych znacznie podwyższa wartość  $\epsilon_r$ . Na przykład piasek suchy ma  $\epsilon_r = 3-5$ , natomiast piasek nasycony wodą (mokry) ma  $\epsilon_r = 20-30$ .

Impulsy odbite na granicy dwóch ośrodków są rejestrowane przez antenę odbiorczą georadaru. W trakcie pomiaru antena nadawcza i odbiorcza są przesuwane wzdłuż wytyczonego profilu. Rejestrowany obraz jest odzwierciedleniem budowy geologicznej ośrodka.

**Metodyka pomiarowa – pomiary georadarowe.** Na złożu piaskowca w Grabowie wykonano dwa profile georadarowe (profil nr 1 i profil nr 2). Na tych samych profilach wykonano również sondowania elektrooporowe. Podobnie jak w metodzie elektrooporowej profil nr 1 miał długość 190 m, zaś profil nr 2 – 300 m. Lokalizację profili pomiarowych przedstawiono na rycinie 1. Pomiary wykonano georadarem ProEx System szwedzkiej firmy Mala Geoscience. W trakcie pomiarów posłużono się antenami ekranowanymi, o częstotliwości 250 MHz. Z uwagi na spodziewaną niewielką głębokość zalegania piaskowców (do 10 m p.p.t.), anteny takie stanowią dobry kompromis pomiędzy zasięgiem głębokościowym a rozdzielczością pomiaru. W terenie testowano również anteny ekranowane, o częstotliwości 500 MHz, ale zasięg głębokościowy pomiaru wykonanego za ich pomocą okazał się zbyt mały. W trakcie pomiarów posłużono się wyzwalaczem odległościowym – kółkiem pomiarowym podłączonym do zestawu anten. Pomiary georadarowe wykonano zimą (w porze letniej należy się spodziewać większego zasięgu głębokościowego), anteny przesuwano po śniegu. W tej sytuacji kółko pomiarowe ślizgało się po śniegu, generując niewielki błąd pomiaru odległości. Nie-

zbędne stało się skorelowanie markerów na profilach z taśmą metryczną rozwiniętą wzdłuż profilu.

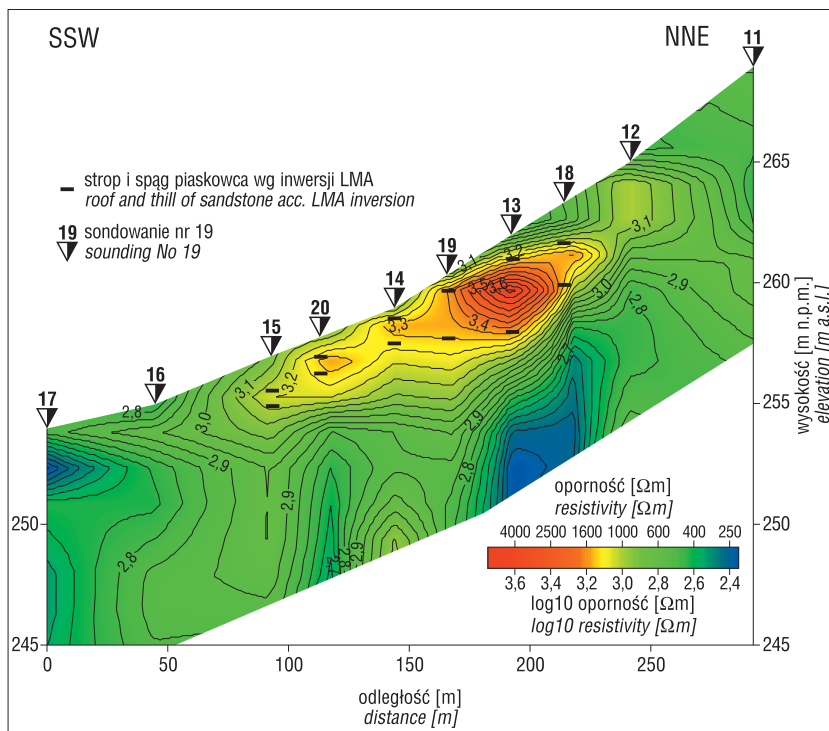
Pomiary prospekcyjne poprzedzono pomiarami na profilach testowych. Na ich podstawie dobrano właściwe parametry rozpoznania (częstotliwość próbkowania sygnału, ilość próbek, czas rejestracji, sumowanie sygnału, odległość pomiędzy trasami). Najistotniejszym parametrem jest czas rejestracji, gdyż wpływa on bezpośrednio na zasięg głębokościowy. Na obu profilach ustalono czas rejestracji na 200 ns, przy takim czasie teoretyczny zasięg głębokościowy wynosi około 10 m p.p.t. Prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w ośrodku oszacowano na podstawie informacji o budowie geologicznej terenu badań (względna przenikalność elektryczna piaskowców waha się od 9 do 14). Przyjęto  $v = 0,09$  m/ns. Na podstawie wartości tej prędkości dokonano konwersji czasowo-głębokościowej na obu eogramach.

Materiał pomiarowy zarejestrowany podczas pomiarów georadarowych wymaga zaawansowanego przetwarzania.

**Tab. 1.** Wartości względnej przenikalności elektrycznej  $\epsilon_r$  i prędkości fali elektromagnetycznej dla różnych ośrodków (Karczewski, 2011)

**Table 1.** Values of relative permittivity  $\epsilon_r$  and velocity of electromagnetic waves (Karczewski, 2011)

Ośrodek Material	$\epsilon_r$	$v$ [cm/ns]
Powietrze Air	1	30
Granit Granite	4-6	13
Piasek i żwir nasycony wodą Sand and gravel aquifer	15,5-17,5	6
Piasek nasycony wodą Sand aquifer	20-30	6
Piasek suchy Sand	3-5	15
Gleba piaszczysta Sandy soil	11-18	7-9
Łupki Shales	5-15	9
Muły, iły Sils and clays	14-36	5-8
Gлина Clay	25-36	4-6
Piaskowiec Sandstone	9-14	8-10
Wapień Limestone	6-11	9-12
Woda Water	81	3,3



**Ryc. 8.** Pseudo-2D przekrój oporności uzyskany w wyniku inwersji 1D metodą Occama z wynikami inwersji 1D metodą LMA wzdłuż profilu 1 (lokalizacja na ryc. 1)  
**Fig. 8.** Pseudo-2D resistivity cross-section as a result of 1D Occam inversion with results of 1D LMA inversion along profile no 2 (location in Fig. 1)

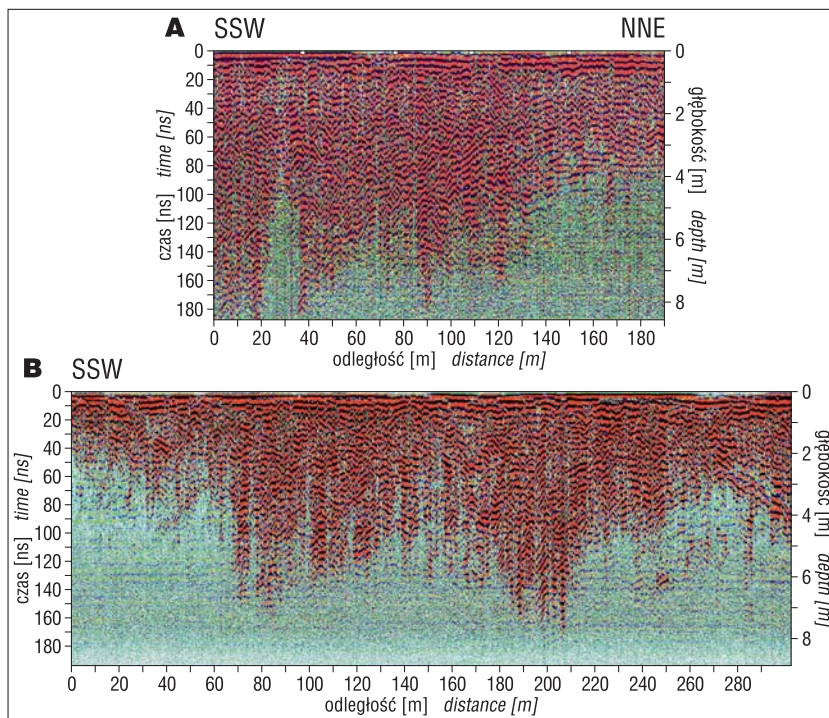
Celem przetwarzania jest poprawa stosunku S/N (ang. *Signal/Noise*), a także poprawa korelacji refleksów użytecznych. Dane przetworzono programem Reflex, niemieckiej firmy Sandmeier. Zastosowano następujące procedury

W wyniku interpretacji 1D, metodą LMA sondowań elektrooporowych (VES), wydzielić można w strefie złożowej cztery warstwy geoelektryczne (ryc. 6). Warstwa górna, o miąższości 1–2 m, odpowiada zwietrzeliźnie w postaci rumszu zalegającego na stropie kompleksu piaskowcowego (ryc. 5). W górnej części tej warstwy zaznacza się 20–40 cm warstwa suchych piasków podglebowych, o oporności około 3000 Ωm (ryc. 6A), lub piaski wilgotne, o oporności około 1000 Ωm (ryc. 6A, B). Wyraźnie wysokooporowy kompleks (ok. 3000 Ωm) odpowiada piaskowcom o spoiwie krzemionkowym lub krzemionkowo-żelazistym. Poniżej piaskowców, na głębokości 5–10 m p.p.t., pojawia się warstwa podścielająca, o oporności niższej o rząd wielkości (200–300 Ωm) (ryc. 6). Brak bezpośrednich danych z odsłoneń lub wierceń nie pozwala na ich identyfikację geologiczną. Kontekst geologiczny pozwala sądzić, że mogą to być zailone lub porowate i zawilgocone piaski i/lub piaskowce kredy dolnej (alb). Przekroje opornościowe uzyskane w wyniku interpretacji 1D metodą Occama, z uwagi na wygładzający charakter tej metody, nie dają tak precyzyjnego wyniku jak metoda LMA. Pozwalają one jednak na wskazanie lokalizacji bloków najbardziej cennego, zwięzłego piaskowca budowlanego, charakteryzującego się opornościami rzędu

korekcję czasu pierwszego wstąpienia, wyrównanie średniego poziomu sygnału do 0, filtrację w dziedzinie czasu i częstotliwości, wzmocnienie według różnych charakterystyk (liniowej, eksponentalnej i dobieranej ręcznie przez operatora), uśrednianie powierzchniowe i inne. Przetworzone echogramy zostały przedstawione na rycinie 9. Na echogramach nie zastosowano odwzorowania morfologii, gdyż algorytm wprowadzania poprawki na topografię w programie Reflex, niemieckiej firmy Sandmeier, użyty w tym badaniu, powoduje silne zniekształcenie przebiegu horyzontów refleksyjnych.

### INTERPRETACJA WYNIKÓW BADAŃ

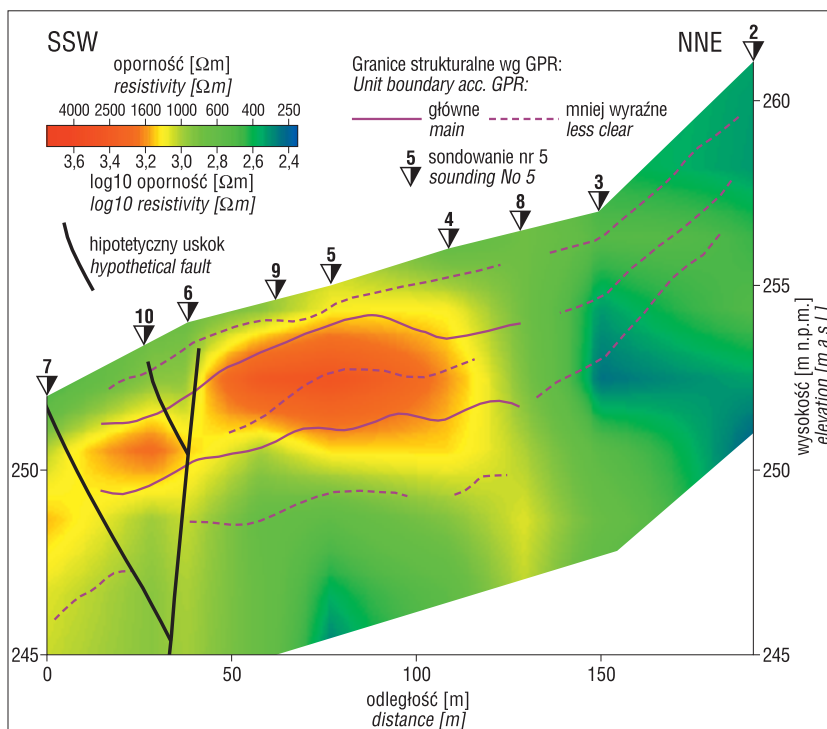
Analiza wyników badań elektromagnetycznych wskazuje, że ośrodek geologiczny zbudowany jest ze skał ogólnie wysokooporowych. Wyinterpretowane oporności w zasadzie nie spadają poniżej 100 Ωm, najwyższe z nich osiągają natomiast 3000 Ωm (ryc. 6). Uwzględniając kontekst geologiczny, są to więc oporności: zwięzłych piaskowców, rumszu skalnego oraz suchych lub zawilgoconych piasków. W wyniku interpretacji 1D, metodą LMA sondowań elektrooporowych (VES), wydzielić można w strefie złożowej cztery warstwy geoelektryczne (ryc. 6). Warstwa górna, o miąższości 1–2 m, odpowiada zwietrzeliźnie w postaci rumszu zalegającego na stropie kompleksu piaskowcowego (ryc. 5). W górnej części tej warstwy zaznacza się 20–40 cm warstwa suchych piasków podglebowych, o oporności około 3000 Ωm (ryc. 6A), lub piaski wilgotne, o oporności około 1000 Ωm (ryc. 6A, B). Wyraźnie wysokooporowy kompleks (ok. 3000 Ωm) odpowiada piaskowcom o spoiwie krzemionkowym lub krzemionkowo-żelazistym. Poniżej piaskowców, na głębokości 5–10 m p.p.t., pojawia się warstwa podścielająca, o oporności niższej o rząd wielkości (200–300 Ωm) (ryc. 6). Brak bezpośrednich danych z odsłoneń lub wierceń nie pozwala na ich identyfikację geologiczną. Kontekst geologiczny pozwala sądzić, że mogą to być zailone lub porowate i zawilgocone piaski i/lub piaskowce kredy dolnej (alb). Przekroje opornościowe uzyskane w wyniku interpretacji 1D metodą Occama, z uwagi na wygładzający charakter tej metody, nie dają tak precyzyjnego wyniku jak metoda LMA. Pozwalają one jednak na wskazanie lokalizacji bloków najbardziej cennego, zwięzłego piaskowca budowlanego, charakteryzującego się opornościami rzędu



**Ryc. 9.** Profile georadarowe: profil nr 1 (A) i profil nr 2 (B) – wykonane antenami ekranowymi o częstotliwości 250 MHz  
**Fig. 9.** GPR profiles: profile no 1 (A) and profile no 2 (B) – measurements with shielded antenna 250 MHz



**Ryc. 10.** Fragment granicy złoży piaskowców z luźnymi piaskami alaskimi  
**Fig. 10.** The boundary between sandstone deposit and loose Albian sands



**Ryc. 11.** Pseudo-2D przekrój oporności uzyskany w wyniku inwersji 1D metodą Occama wzdłuż profilu nr 1 z naniesionymi granicami strukturalnymi uzyskanymi metodą georadarową

**Fig. 11.** Pseudo-2D resistivity cross-section as a result of 1D Occam inversion along profile no 1 with rock unit boundary from GPR method

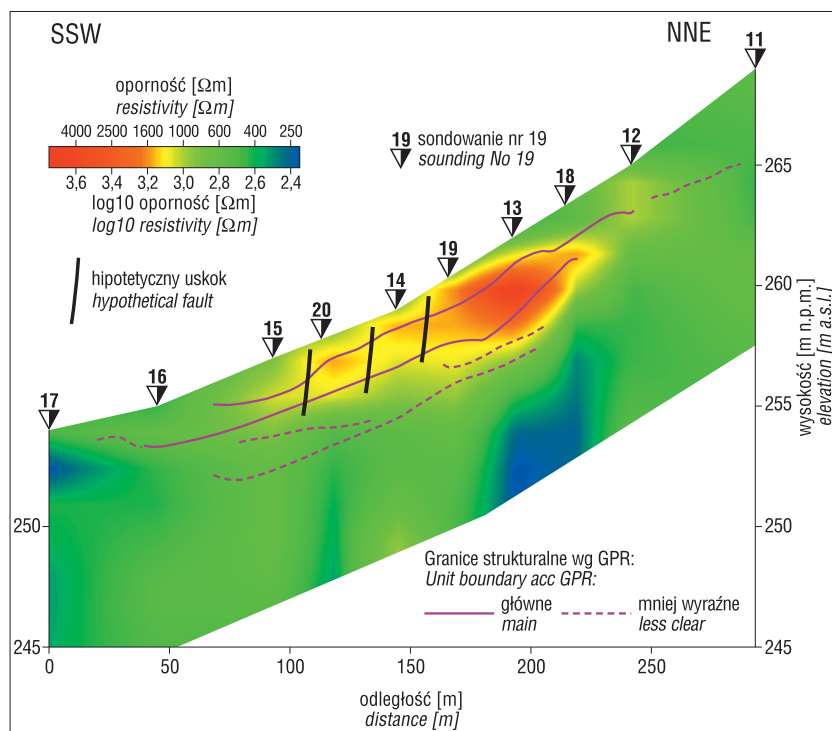
2–3 tys.  $\Omega m$  (ryc. 7, 8). Bardziej precyzyjne granice występowania wspomnianego piaskowca uzyskano metodą LMA, należy jednak pamiętać, że metoda ta obciążona jest zjawiskiem niejednoznaczności interpretacji (ryc. 7, 8). Wyinterpretowany obraz potwierdza opinię zawartą w dokumentacji złożowej, że kopalinę użyteczną w tym złożu stanowi piaskowiec występujący w postaci nieregularnych brył (Miziołek, 2005). Zastanawiające jest natomiast, w jakim ośrodku geologicznym powyższe bryły są zanurzone?

Biorąc pod uwagę obserwacje w odsłonięciach rozrzuczonych po obszarze badań, najbardziej prawdopodobne wydaje się występowanie bloków zwięzłego (krzemionkowego, krzemionkowo-żelazistego) piaskowca w otoczeniu słabiej zdiagenezowanych piaskowców lub luźnych piasków tego samego wieku, lub nieco starszych (ryc. 10). Zawilgocone lub zailone piaski i/lub piaskowce porowate charakteryzują się opornościami rzędu kilkuset  $\Omega m$  i wyraźnie kontrastują z blokami piaskowca krzemionkowego. Powyższe dane wskazują na selektywną lokalną cementację krzemionkową lub krzemionkowo-żelazistą.

Innym czynnikiem, który należy uwzględnić, jest tektonika. Wysokooporowe bloki piaskowca poprzecinane są prawdopodobnie uskokami schodowymi, zrzucającymi kolejne fragmenty złoży ku południowi. Uskokom zazwyczaj towarzyszą strefy zluźnień i spękań ułatwiających migrację wody i obniżających oporności (ryc. 11, 12).

Wyniki interpretacji profilowań georadarowych odnoszą się do granic odbijających falę elektromagnetyczną. Zaznaczają się dwie wyraźne granice odbijające (linia ciągła – ryc. 11, 12), z których górna wiąże się wyraźnie ze stropem kompleksu piaskowcowego. Przebieg tej granicy odzwierciedla erozyjne zróżnicowanie stropu piaskowca. Na przekroju nr 1 ta granica refleksyjna jest w wysokim stopniu zgodna ze stropem wyinterpretowanego kompleksu wysokooporowego (ryc. 11). Dość dobrą zgodność położenia tych granic obserwuje się także na przekroju nr 2 (ryc. 12). Dolna z powyższych granic koreluje się ze spągiem wysokooporowego kompleksu piaskowców. Podobnie jak w przypadku górnego horyzontu odbijającego, zgodność tych granic jest większa dla przekroju nr 1 niż dla przekroju nr 2.

Obok dwóch głównych granic refleksyjnych na obydwu przekrojach zostały wyinterpretowane horyzonty mniej wy-



**Ryc. 12.** Pseudo 2D przekrój oporności uzyskany w wyniku inwersji 1D metodą Occama wzdłuż profilu nr 1 z naniesionymi granicami strukturalnymi uzyskanymi metodą georadarową

**Fig. 12.** Pseudo 2D resistivity cross-section as a result of 1D Occam inversion along profile no 1 with rock unit boundary from GPR method

raziste (linia przerywana – ryc. 11, 12). Na przekroju nr 1 zaznacza się płytki horyzont (na głębokości kilkudziesięciu cm p.p.t.) rozdzielający poziom zwietrzelinowy oraz granica wewnątrz kompleksu piaskowcowego, o nierozpoznanej identyfikacji geologicznej (ryc. 11). Niezidentyfikowane horyzonty odbijające pojawiają się w dolnej części obydwu przekrojów (ryc. 11, 12).

## PODSUMOWANIE

Analiza wyników badań geofizycznych wykonanych w rejonie Góry Chełmo potwierdza skuteczność kompleksu metod elektromagnetycznych w rozpoznawaniu złóż piaskowców budowlanych, a w ogólności złóż surowców skalnych. Granice złoża, zawierającego dobrej jakości surowiec, wyraźnie zaznaczają się w rozkładzie oporności, tworzą też horyzonty odbijające falę elektromagnetyczną. Rozkład oporności wyinterpretowany na podstawie pionowych sondowań elektrooporowych pozwala zarówno na oszacowanie położenia granic produktywnej części złoża i wewnętrznego jego zróżnicowania, jak też na rozpoznanie lokalnych struktur tektonicznych. Powierzchniowe rozpoznanie geofizyczne jest szczególnie istotne w przypadku złóż o charakterze gniazdowym lub też występujących w postaci izolowanych bloków, jak w opisanym powyżej przypadku. Brak przestrzennego rozpoznania złoża może pociągnąć za sobą znaczne straty finansowe w razie nietrafnej lokalizacji wyrobisk eksploatacyjnych. Ponieważ wykonane badania geoelektryczne mają charakter fragmentaryczny (dwa krótkie profile pomiarowe), jest wskazane rozszerzenie zakresu prac pomiarowych.

Geologiczna interpretacja wyników badań została dowiązana do pobliskich odsłoneń powierzchniowych, będących niewielkimi wyrobiskami poeksploatacyjnymi. Żadne z tych odsłoneń nie sięga do podłoża zwięzłych piaskowców budowlanych. Geologiczna interpretacja podłoża nie ma w związku z tym potwierdzenia w bezpośrednich obserwacjach. Interesująca jest w tej sytuacji weryfikacja wyników interpretacji badań elektromagnetycznych za pomocą przynajmniej pojedynczego wiercenia sięgającego poniżej spągu piaskowca. Zadawalające będzie wykonanie dwóch wierceń w strefie złożowej i poza złożem.

Niniejszy artykuł został opracowany w ramach prac statutowych Katedry Geofizyki WGGiOŚ AGH.

Autorzy dziękują P.P.B. i R.G. GEOSTANDARD Sp. z o.o. za udostępnienie danych z sondowań elektrooporowych (VES).

## LITERATURA

- ANNAN A.P. 2001 – Ground Penetrating Radar. Workshop Notes, Sensors & Software.
- CIEŚLIŃSKI S. 1960 – Biostratygrafia i fauna albu Polski. Czterdzięci lat Instytutu Geologicznego. Pr. Inst. Geol., 30: 6–20.
- CONSTABLE S.C., PARKER R.L. & CONSTABLE C.G. 1987 – Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, 52 (3): 289–300.
- KARCZEWSKI J., ORTYL Ł. & PASTERNAK M. 2011 – Zarys metody georadarowej. Wyd. drugie popr. i rozszerzone. Wydawnictwa AGH.
- KOEFOD O. 1979 – Geosounding principles, 1, Resistivity Sounding Measurements Elsevier Scientific Publ. Co., Amsterdam–Oxford–New York: 519 pp.
- KONDRACKI J. 1964 – Regiony fizycznogeograficzne Polski. Poznań Świat, XII, nr 4 (137).
- MIZIOŁEK E. 2005 – Dokumentacja Geologiczna złoża piaskowca „Grabowie”, Łódź, wrzesień 2005.
- LUNIEWSKI A. 1947 – Z geologii okolic Radomska. Biul. Państw. Inst. Geol., 38: 9–18.
- DOKUMENTACJA P.P.B. i R.G. GEOSTANDARD SP. Z O.O. 2013 – Opracowanie wyników elektrooporowych badań geofizycznych wykonanych w celu poszukiwania i rozpoznania złoża piaskowca „Zagórze III”, Wrocław.
- POŻARYSKI W. 1971 – Tektonika elewacji radomskiej. Roczn. Pol. Tow. Geol., 41: 169–178.
- POŻARYSKI W. 1974 – Budowa geologiczna Polski. Tektonika, Tom IV. Praca zbiorowa. Wyd. Geol., Warszawa: 322–329.
- REYNOLDS J.M. 2011 – An introduction to applied and environmental geophysics, Second edition. John Wiley and sons, Chichester, UK: pp. 796
- TELFORD W.M., GELDARD L.P. & SHERIFF R. A. 1990 – Applied geophysics, Second edition: Cambridge Univ. Press, Cambridge: pp. 770.
- WĘGROWSKI. A. 1983 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000. Arkusz Rzejowice (774). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- WĘGROWSKI. A. 1990 – Objaśnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski 1:50 000. Arkusz Radomsko (773). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- WĘGROWSKI. A., SŁOWAŃSKI W. & KOWALCZEWSKI Z. 1987 – Objaśnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski 1:50 000. Arkusz Rzejowice (774). Państw. Inst. Geol., Warszawa.